

軸力支持下で腐食鉄筋取替可能な RC柱の実験的検討

上田 知弥¹・植村 佳大²・高橋 良和³

¹学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: ueda.tomoya.83a@st.kyoto-u.ac.jp (Corresponding Author)

²正会員 京都大学助教 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: uemura.keita.3n@kyoto-u.ac.jp

³正会員 京都大学教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: takahashi.yoshikazu.4v@kyoto-u.ac.jp

現行の塩害対策では、腐食が重度な場合鉄筋の取替を含む大規模更新を行うが、柱では容易には行うことができない。そこで本研究では、軸力支持下で容易に腐食鉄筋の取替が可能なメタボリズム RC 柱構造の開発を目指す。提案構造は、鉄筋腐食を許容し腐食が顕在化した際鉄筋ごと取替を行う可換部と可換部取替時に軸力を支持する永続部からなり、維持管理の観点から可換部永続部一体型の断面としている。提案構造を有する供試体を作成し、軸力支持下での取替実験及び正負交番載荷実験を実施した。その結果、腐食の有無に依らず軸力支持下で鉄筋取替ができ、取替が復元力特性に影響を与えないことを確認した。また、取替時の永続部可換部間の付着の有無による影響を検証し、せん断ひび割れ抑制の観点から永続部可換部間の付着促進が望ましいことが分かった。

Key Words: RC column, corrosion, metabolism, replacement, cyclic loading

1. 背景

現在日本では、高度経済成長期以降に作られた大量の土木構造物が更新の段階に来ており、鉄筋コンクリート(以下RC)構造物の経年劣化による性能低下が懸念されている。飛来塩分や路面凍結防止剤の塩分によって引き起こされる塩害は、維持管理上の課題の一つであり、発生するとRC内部の鉄筋腐食が進行し耐荷性能の低下が起きるため、対策が必要である。現在塩害に対する対策の一つに、かぶりコンクリートをはつり断面修復材を埋め戻す断面修復工法が挙げられる。断面修復工法を行う際、鉄筋腐食が重度の場合鉄筋の取替を同時に行い力学的性能の回復を図ることがある。川西ら¹⁾は、塩害が著しく進行した栈橋構造物の床板下面及び壁面に対して鉄筋の取替を伴う断面修復工法を行い、その適用性を検討した。しかし、死荷重を軸力で支持する必要がある柱構造では鉄筋の取替を伴う大規模更新を行う際には上部工の交通規制や支保工の設置、工事区間の分割などの対策が必要となる。これらは交通量の大幅な低下を招くことから社会へ与える影響が大きいと考えられ、そのような大規模

更新が不要な維持管理戦略が理想と言える。これを実現するためには高度な維持管理が必要となるが、開発途上国においてはこのような維持管理を行える技術者が不足、先進国においても少子高齢化による働き手の減少により今後不足する可能性がある。よって高度な維持管理技術を必要とせず、かつ社会への影響が小さい維持管理方策の開発が求められているといえる。

一方で、地震時の復旧性向上の観点から、軸力支持下での鉄筋取替を可能とする柱構造が提案されている。Chengら²⁾は、RC橋脚に対し、地震時に損傷した鉄筋の取替とFRPによる補修法を提案している。しかしながら、彼らの検討では、鉄筋取替は軸力を除荷した状態で行われており、軸力支持下での鉄筋取替は実証されていない。また、藤倉ら³⁾はレベル2地震動により損傷した橋脚の塑性ヒンジ部の取替が可能な構造の開発に向けて、実験的検討を実施している。その中で、軸力支持下での塑性ヒンジ部の撤去には成功したものの、過大な残留変位の影響で再打設は行っておらず、柱の性能回復の観点で課題が残されている。

そのような中、著者らは、既往の研究により耐震性能

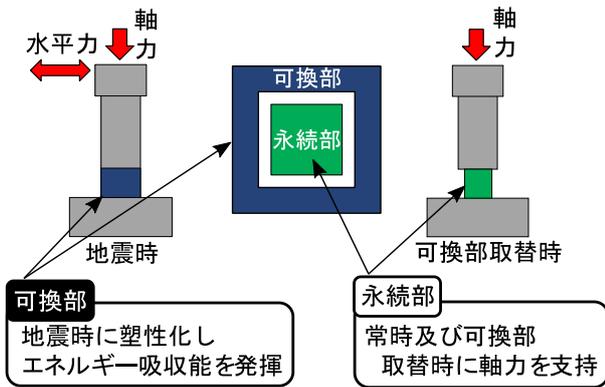


図-1 メタボリズム耐震橋脚構造

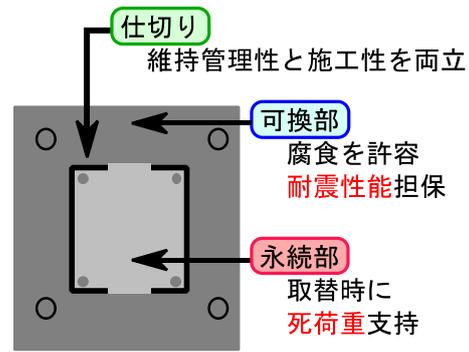


図-2 提案構造の概略図

の新陳代謝を目指すメタボリズム耐震橋脚構造を提案している^{4,5,6)}。この柱構造は、軸力支持下で部材取替を行うことで耐震性能の更新を図るものであり、過去の実験的検討により、軸力支持下で部材が取替可能であること及び取替により耐震性能が更新できることが確認されている。そこで本研究では、部材の取替が可能であるメタボリズム耐震橋脚構造の考えを柱構造の維持管理方針に応用し、軸力支持下で腐食鉄筋を取替可能とする柱構造の開発を目指す。

2. 提案構造

(1) メタボリズム構造の維持管理方針への応用

著者ら^{4,5,6)}が提案したメタボリズム耐震橋脚構造の概要を図-1に示す。メタボリズム耐震橋脚構造は地震発生時に塑性化することでエネルギー吸収性能を發揮する可換部と、可換部の取替時に軸力を支持する永続部から成る機能分離式の柱構造である。可換部の取替により耐震性能の更新が可能となる。

一方、維持管理において塩害の原因物質となる水や酸素、塩化物イオンは通常外部から浸透するため、断面外縁部がその影響を受けやすいと予想される。この特徴は予め取替える場所が決まっているメタボリズム構造に適しており、腐食劣化が予想される箇所の取替を前提で設計することで、取替による性能回復、更新を望むことができる。よって本研究では、耐震性能を担保し腐食劣化時に取替により更新を行う可換部と、取替時にも存続し死荷重支持機能を担保する永続部からなるメタボリズムRC柱構造(以下提案構造)を提案し、その実現可能性を検証する。

(2) 提案構造の特徴

提案構造の概略図を図-2に示す。腐食による劣化が進行しやすい外縁部を可換部、腐食の影響を受けにくい柱中心部を永続部とする。軸方向鉄筋の腐食劣化が顕在化

した際は、腐食した軸方向鉄筋も含め可換部を撤去し、再度可換部を設置することで性能の回復、更新を図る。永続部については、可換部の取替作業時に死荷重を支持する性能を要求する。

この構造において重要となるのは可換部取替のタイミングである。塩害は発生すると急速に進行することから、現行の設計基準では鋼材腐食を許容していない。しかし、Maらの研究⁷⁾によると、腐食による質量減少率5%では耐力に大きな影響がないとしている。そこで、本提案構造では質量減少率5%程度までの可換部の軸方向鉄筋の腐食を許容するものとし、腐食した軸方向鉄筋を含む可換部の取替を設計段階から想定する。また、鉄筋腐食の進行に伴い表面に腐食ひび割れが現れると、ひび割れから水や空気が侵入しやすくなり、腐食による劣化が加速するため注意が必要である。さらに、力学的観点では問題がない場合でも、腐食ひび割れや錆汁による外観の悪化が利用者に不安感を与える場合があり、その心理的影響を考慮する必要性が示唆されている⁸⁾。そのため、提案構造では、腐食の進行及び利用者への心理的影響を考慮して、可換部取替を行うタイミングは「表面に腐食ひび割れが目視で観察されたとき」を基本とする。これにより、腐食ひび割れが表面に現れるまでは高度なメンテナンスを必要としない構造が実現可能となる。

続いて、維持管理において、従来構造物に対する大規模更新と提案構造に対する更新の違いを図-3に示す。図-3(a)のように鉄筋の取替を伴う大規模更新では、作業時に軸力支持性能・耐震性能が著しく低下することから、容易には行うことが出来ない。一方で提案構造では、取替作業時にも軸力支持性能を維持できるように永続部の設計を行う。設計段階から取替時を見据えた安全設計がなされるため、腐食が顕在化した際は迅速に部材取替の判断を下すことが可能となる。これにより支保工等の設置をすることなく軸力支持下で施工を開始できるため工期短縮が実現される。また、永続部にL1地震動などの最低限の耐震性能を持たせる設計にすることで、部材取替の判断をより積極的に行うことが可能になる。

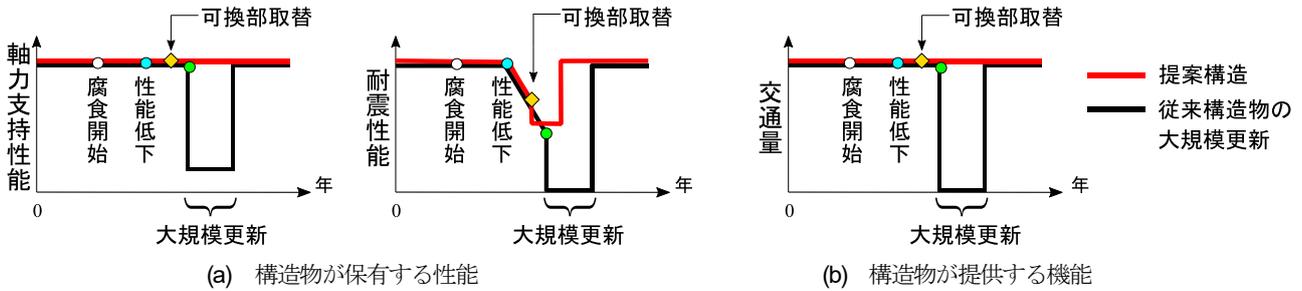


図3 大規模更新と提案構造の更新による構造物性能及び機能の違い

以上より、提案構造では供用しながら施工を行うことが可能であり上部工の交通量を減らす必要が無くなるため(図-3(b))、社会へ与える影響を小さくすることが出来ると考えられる。

(3) 永続部の設計

可換部取替の際、軸力を永続部のみで支持する必要がある。設計時には、このタイミングで軸力により永続部が座屈しないよう照査を行う必要がある。ここでは式(1)に示すオイラー座屈の式を用いて荷重の照査を行うものとする。

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_k^2} \quad (1)$$

ここに、 P_{cr} は座屈荷重、 E はヤング係数、 I は断面二次モーメント、 L_k は座屈長さである。

また、軸力の偏心に備え永続部に引張鉄筋を導入するが、永続部は取替後も継続して利用するため永続部の鉄筋腐食は許容できない。そこで、永続部の引張鉄筋については式(2)に示す塩化物イオン濃度の照査式を用いて、供用年数中に鋼材位置の塩化物イオン濃度が腐食発牛限界塩化物イオン濃度を超えることがないよう適切にかぶり設計する。

$$C(x, t) = \gamma_{cl} \cdot \left[C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1x}{2\sqrt{D_{ap} \cdot t}} \right) \right\} \right] \quad (2)$$

ここに、 $C(x, t)$ はコンクリート表面からの深さ x mm、時刻 t 年における塩化物イオン濃度、 C_0 はコンクリート表面の塩化物イオン濃度、 D_{ap} は塩化物イオンのみかけの設計拡散係数、 erf は誤差関数、 γ_{cl} は予測の精度に対する安全係数である。

なお、永続部のみ状態に対して最低限の耐震性能を求める場合、導入する引張鉄筋の材料特性や径を適切に選択、配置することで確保するものとする。

(4) 可換性と維持管理性の両立

取替時の施工性を考慮すると、永続部と可換部は分離していることが望ましい。著者ら^{4),5)}が検討したメタボリズム構造も、永続部と可換部の間には空隙が存在するアンボンド型となっている。しかし、その空隙は水や空気の通り道、あるいはたまり場となり鋼材腐食を始め中性化、凍害などを促進する要因となるため、維持管理性を考慮する場合、永続部と可換部は一体型となることが望ましい。

そこで提案構造では、可換性と維持管理性を両立するため、永続部と可換部の境界に、仕切りを配置し、仕切りを埋めたまま打設を行うこととする(図-2)。この際、間隔を空けて配置することで永続部と可換部が連続となる領域を確保し、通常時は永続部と可換部は一体型として挙動、取替時には仕切りを導入した部分が不連続になることで施工性が向上することを期待する。

3. 実験方法

(1) 本実験の目的

本研究では、実験的検討により提案構造の実現可能性を検証する。具体的には、軸力支持下での可換部取替実験及び正負交番載荷実験を通じて、永続部のみの軸力支持下で可換部の取替が可能であること及び取替作業が耐震性能に与える影響について検討する。また、可換部の軸方向鉄筋腐食の有無による違いと、可換部の付着性状の違いが耐震性能に与える影響について検討する。

なお、実際の橋脚においては、水のたまり場となりやすい橋脚根本の腐食が進行しやすいと考えられる。あるいは上部工の排水設備の近くなど特定の環境下において局所的な腐食が発生する可能性もある。そのような場合は、腐食箇所のみを取替えることで性能の更新を図ることができ、本構造は将来的には局所的な取替を可能とすることが望ましい。しかし、本研究では提案構造における軸力支持下での鉄筋の取替可能性及び取替による復元力特性への影響に焦点を当てるため、取替による影響が一番大きくなると考えられる、可換部軸方向鉄筋をすべ

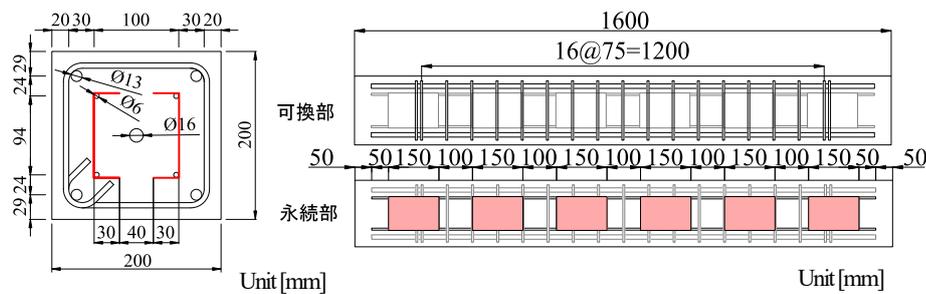


図4 供試体の断面図及び側面図 [標準型のみ鋼板(色付部)無し]



図5 仕切りの鋼板

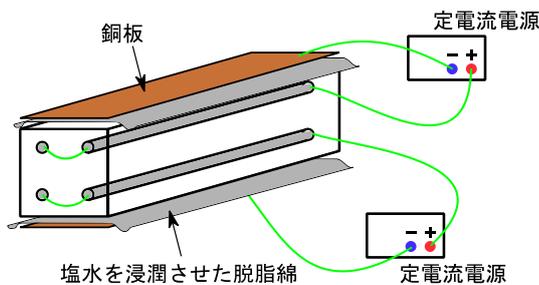


図6 電食の概略図



(a) 切れ込みを入れる様子



(b) チッパーではつる様子

図7 取替実験の様子

て取替える状況を想定した実験を行うこととする。

(2) 実験供試体概要

柱を模擬するためPC鋼棒(C種1号, $\phi 13$)を用いて軸力を載荷したRC梁供試体を計4体作成し実験を行う。なお、PC鋼棒は断面中央に配置したシース管内部に挿入することでアンボンド化している。今回の実験供試体の寸法を図4に示す。本構造では、中心に位置する100 mm×100 mmの領域を永続部、全断面における永続部以外の箇所を可換部と呼ぶ。取替を行う供試体に関しては、取替前後で断面は同じとしている。今回は電食による腐食模擬を行っており、腐食進行の形態が暴露による腐食とは異なるため引張鉄筋のかぶりについては具体的な計算は行っていない。また、永続部には偏心に備え引張鉄筋を配置したが、本供試体での要求性能はあくまで軸力支持性能のみとし、余震への抵抗性は要求しないこととした。

永続部と可換部の仕切りについては、厚さ0.8 mmの鋼板(図5)を導入し、間隔を空けて配置することで、打設時に永続部にまでコンクリートが流れ込むように、また耐力に影響が出ないように配慮した。

また、用意した供試体は、標準型、取替型、腐食-取替型、アンボンド型の4体である。すべての供試体に対し、軸力の載荷及び正負交番載荷実験を行う。取替型供試体は、可換部の取替実験を行う供試体である。腐食-取替型供試体は、可換部の軸方向鉄筋の腐食促進を行い、腐食終了後に可換部の取替実験を行う供試体である。標準型と取替型を比較することで、永続部で軸力を支持したまま取替を行うことによる影響を、腐食-取替型と標準型、取替型を比較することで腐食が発生した状態で可

換部の取替を行うことによる影響を考察する。アンボンド型供試体は、永続部と可換部の付着を完全に切ったアンボンド型供試体である。初めに永続部のみ打設し、永続部のみに軸力を載荷する。取替時には可換部と永続部の付着を切った状態で打設を行う。これにより、永続部と可換部の付着の有無による影響を考察する。

(3) 実験概要

a) 軸力載荷

すべての供試体に対し、PC鋼棒を用いてポストテンション方式で軸力を載荷した。載荷軸力は全断面に対して1.0 MPaとなる40 kNとし、継続的に軸力を計測するためロードセルを入れた状態で載荷を行った。アンボンド型は永続部にのみ載荷を行い、載荷する軸力は他3供試体と同様に40 kNとした。

b) 腐食促進

定電流電源により鉄筋を強制的にアノード溶解させる電食法を用いて、腐食-取替型の可換部軸方向鉄筋の腐食促進を行った。腐食促進の概略図を図6に示す。供試体上面と下面にそれぞれ電解質溶液(3% NaCl溶液)を浸したシートを銅板で挟み、可換部の軸方向鉄筋をアノード、銅板をカソードとした上で電流密度 $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ 、電流値0.21 Aの直流電流を印加した。電食期間はファラデー則に基づき平均質量減少率が6.0%となるように設定し試験を行った。また、腐食を許容するのは可換部の軸方向鉄筋のみであり永続部の軸方向鉄筋は腐食促進を避ける必要がある。そこで上側の可換部軸方向鉄筋2本は上面の銅板、下側の可換部軸方向鉄筋2本は下側の銅板との間で回路が形成されるようにし、永続部軸方向鉄筋



図-8 アンボンド型のシート及び端部処理



図-9 荷重システム



図-10 腐食促進終了の腐食一取替型供試体

表-1 コンクリートの材料試験結果

供試体種別	圧縮強度 [N/mm ²]	
	永続部	可換部
標準型	35.0	
取替型	35.0	41.6
腐食一取替型	37.4	46.9
アンボンド型	37.4	49.1

表-2 鉄筋の材料試験結果

	使用場所と用途	規格	材質	降伏強度 [N/mm ²]	弾性係数 [N/mm ²]
D-13(a)	標準型の可換部 軸方向鉄筋	D-13	SD-345	384.3	1.68×10 ⁶
D-13(b)	標準型以外の可換部 軸方向鉄筋	D-13	SD-345	392.1	1.65×10 ⁶
D6	すべての帯鉄筋及び 永続部軸方向鉄筋	D-6	SD-345	373.6	1.90×10 ⁶

が回路の一部とならないように配慮した。

c) 取替実験

取替実験は、可換部の撤去と再打設を指す。可換部の撤去は、コンクリートカッターとチップャーを用いた。その際、図-7のように、永続部に到達しない深さの切れ込みをコンクリートカッターで入れ、可換部をチップャーではつた。なお、この間も軸力は荷重し続けている。可換部撤去後、可換部の軸方向鉄筋及び帯鉄筋を再度配筋し、打設を行った。

アンボンド型は永続部のみで打設をしているため可換部の撤去は行わなかった。再打設の際、可換部の鉄筋を組む前に永続部にビニールシートを巻くことで永続部と可換部の付着を完全に切ることにした。ただし、全体としては永続部と可換部が一体となって挙動するよう端部のみ付着を許容した(図-8)。

d) 正負交番荷重実験

荷重システムを図-9に示す。等曲げ区間300 mm、せん断スパン530 mmの2点荷重装置を用いて正負交番荷重実験を行った。荷重パターンは正負交番変位漸増方式で行い、基準振幅(4 mm)の整数倍の変位を繰り返し回数1回で荷重した。

計測データは、荷重荷重、梁中央部の変位、PC鋼棒

の軸力、軸方向鉄筋及び帯鉄筋のひずみである。

(4) 使用材料

表-1に本実験で使用したコンクリートの圧縮強度、表-2に鉄筋の引張強度を示す。圧縮強度、引張強度はそれぞれ試験片3つの平均値を記載している。

4. 腐食促進及び取替実験の結果

(1) 腐食促進

腐食促進終了後の供試体を図-10に示す。腐食させた軸方向鉄筋については、取替実験の際に取り出した後で、10%クエン酸水素二アンモニウム水溶液(60℃)に24時間浸潤させて腐食生成物を除去し、腐食量を測定した。測定結果は平均質量減少率5.7%であった。

(2) 取替実験

はつり作業終了後の取替型、腐食一取替型の写真を図-11に示す。また、取替作業時の取替型の軸力の推移を図-12に、取替型の永続部の軸方向鉄筋ひずみの推移を図-13に示す。これにより、可換部撤去時に軸力が維持され、永続部に軸力が移行していることが分かる。永続



(a) 取替型



(b) 腐食-取替型

図-11 可換部撤去終了後の型供試体

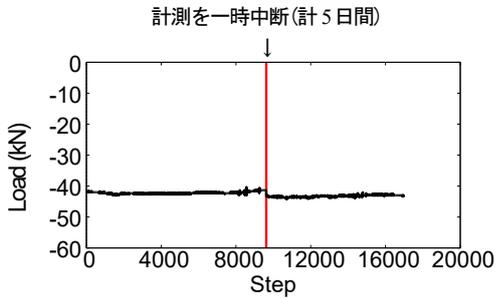


図-12 取替型の可換部撤去時の軸力推移

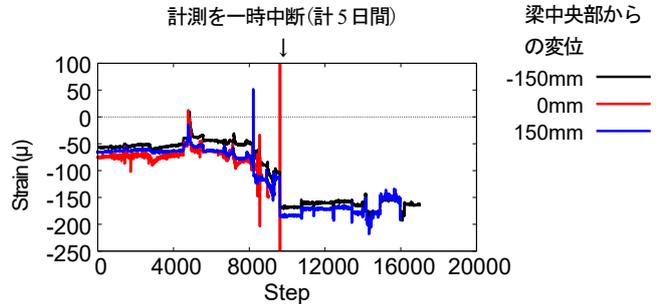


図-13 取替型の可換部撤去時の永続部軸方向鉄筋ひずみの推移



図-14 鋼板位置ではのはつり作業の様子

部の軸方向鉄筋ひずみの理論値は、全断面で軸力40 kNを支持している場合 $35 \mu\epsilon$ 、永続部のみで軸力40 kNを支持している場合 $143 \mu\epsilon$ となり、可換部の撤去前後で $108 \mu\epsilon$ 増加する。図-13のひずみ増分の平均値は $116 \mu\epsilon$ であることから、本実験で計測された永続部軸方向鉄筋のひずみ変化は概ね理論値と一致している。このことから、作用軸力が永続部に伝達していることが分かり、永続部のみで軸力を支持したまま可換部の撤去が可能であることを確認できた。

また、図-14に示すように鋼板位置では可換部コンクリートと鋼板が外れやすく、鋼板が無い位置に比べ容易に可換部が取り外せたことから、はつり作業の効率化がなされたことが確認できた。また、鋼板を目印にすることではつり作業時の永続部への損傷防止もなされている。よって、可換部と永続部との境界に配置した鋼板に一定の効果があることが確認できた。

以上より、永続部と可換部との縁を切らずとも、可換部の軸方向鉄筋の取替が可能であることが示された。

5. 正負交番載荷実験の結果と考察

(1) 荷重-変位関係

実験で得られた各供試体の荷重-変位関係を図-15に

示す。ここで、アクチュエータがRC梁を押しているときの荷重及び変位を正、引いているときの荷重及び変位を負とする。また、腐食-取替型の実験の際、使用したアクチュエータの変位計の接続不良のため $+1 \delta_y$ 載荷時の荷重データが取れておらず、腐食-取替型の荷重-変位関係は $-1 \delta_y$ からの記載である。

今回、すべての供試体において、曲げ破壊の挙動が得られた。初めに可換部の取替そのものが復元力特性に与えた影響について考察する。

取替型及び腐食-取替型では、仕切りの鋼板がない場所で可換部と永続部の付着がなされていることから標準型と同様の復元力特性を示すことが期待された。しかし、図-15の標準型と取替型、腐食-取替型の荷重-変位関係を比較すると、各変位での最大荷重が一部異なることが分かる。また、各供試体において、同一振幅での荷重の値が正負で異なっている。そこで、正負交番載荷実験終了後に供試体をコンクリートカッターで切断し断面を確認したところ、供試体断面の上下で軸方向鉄筋のかぶりが異なっており、これが復元力特性の正負の違いに影響を与えたと考えられる。

また、標準型は全断面に軸力が載荷されているのに対し、取替型及び腐食-取替型では、永続部にのみ軸力が載荷されており、実験開始時の初期軸力の作用性状が異なっている。取替型及び腐食-取替型では、正負交番載荷に伴って中立軸が断面外側に寄ることで、軸力が徐々に可換部に移っていくと考えられるが、初期軸力の作用性状の違いが復元力特性に影響を与えた可能性も考えられる。その他にも復元力特性の違いが出た要因として、取替前後で材料特性が変化したこと、仕切りの鋼板の有無などが考えられる。そこで、5.(2)にて、プッシュオーバー解析を実施し、各実験供試体の復元力特性について検討した。

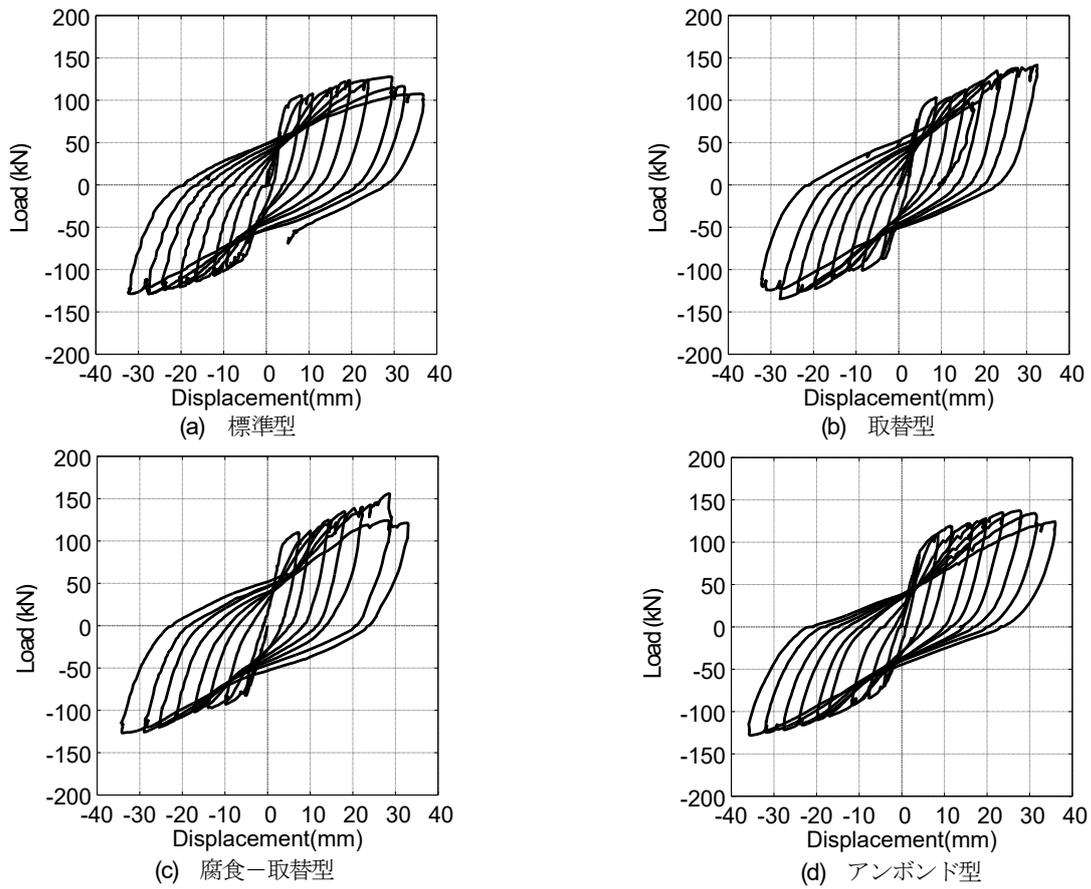


図-15 各供試体の荷重-変位関係

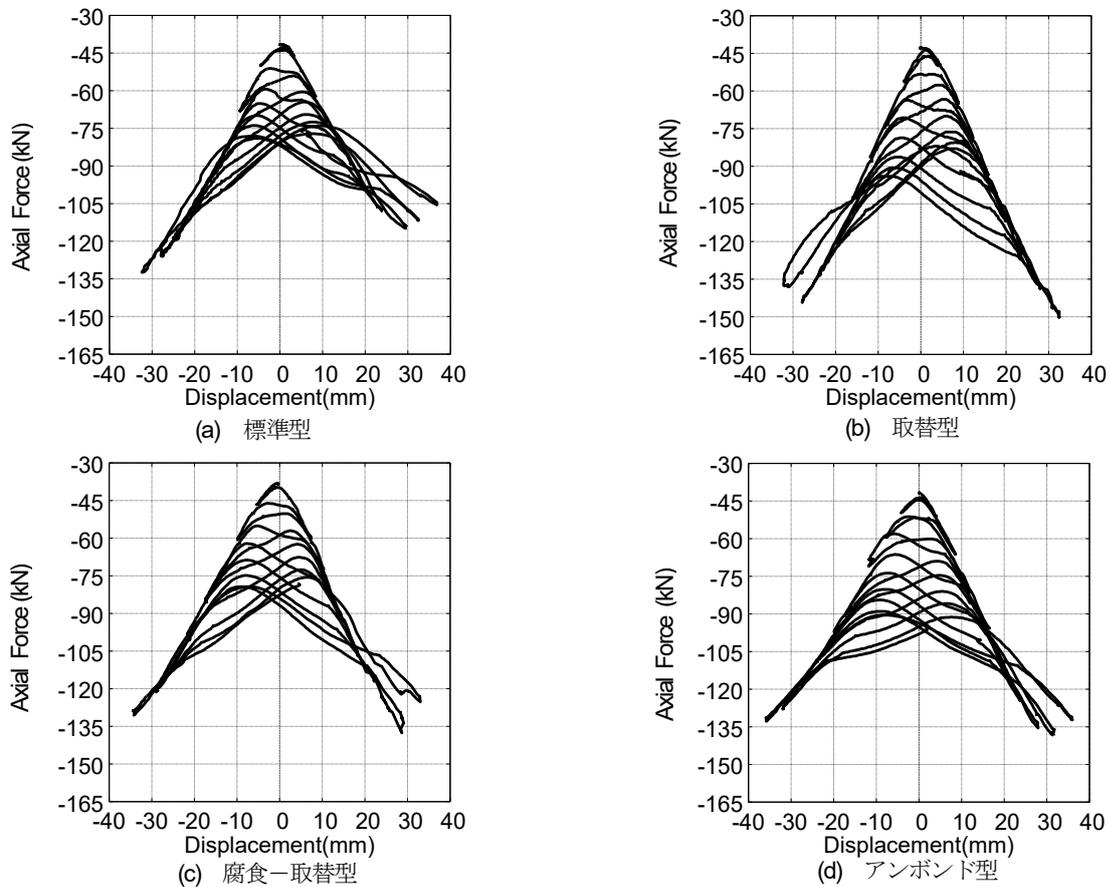


図-16 各供試体の軸力-供試体変位関係

また、図-15の荷重-変位関係より、各供試体で明確な二次剛性が発現していることが分かる。これは供試体変位の増大に伴い鉄筋が軸方向に塑性化した際、PC鋼棒を留めるナットにより軸方向の変形が拘束されていることで、PC鋼棒による軸力が増大したためであると考えられる。実際、図-16の軸力-供試体変位関係から変位の増大に伴い軸力が増加していることが確認でき、軸力増大に伴い断面耐力が増加したことで二次剛性が発現したと考えられる。なお、二次剛性の大きさは供試体間で異なっているものの、実際の柱構造では死荷重による軸力は一定であり、二次剛性は発現しないと考えられる。

続いて、可換部と永続部の付着の有無が復元力特性に与えた影響を考察する。標準型とアンボンド型の荷重-変位関係を比較すると、アンボンド型の履歴ループで囲まれた面積が小さくなっていることが分かる。この要因に関しては5.(3)にて詳細に述べる。

(2) 各供試体間で復元力特性に差異が見られた要因について

各供試体間で復元力特性に差異が見られた要因について検討するため、実験供試体を対象としたファイバーモデルによる解析を実施した。図-17に各供試体のモデル化した断面を、図-18に解析モデルの全体図を示す。なお、取替型及び腐食-取替型のモデル(図-17(b))では、永続部と可換部で材料特性を変化させているものの、永続部と可換部の付着を考慮し、一体型の断面としてモデル化している。アンボンド型のモデル(図-17(c))では、可換部を口の字型、永続部を可換部の空隙と同じ大きさ

の正方形断面とした2部材を用いる。可換部と永続部は別々の梁として挙動させるが、各節点で鉛直方向の追従をさせることでモデル化を行った。すべてのモデルにおいて材料特性は、実験で得られたものを使用している。支点及び載荷点については、実験供試体と同じ位置に設定し、端のノードに水平方向の力を与えることで軸力載荷を表した。

また、5.(1)で述べた標準型とその他の供試体での初期軸力の作用性状の違いについては、植村ら⁹⁾がRC巻き立て補強を行った中実断面RC柱の解析的検討にて、全断面に軸力を付加した場合と、あと施工を考慮して軸力付加後にRC巻き立て部を取り付けた場合の荷重-変位関係の差が小さいことを示している。本実験では植村らの検討より軸力比が低いいため、全断面に軸力を付加した解析結果が、永続部のみに軸力載荷した後可換部を取り付けた解析結果と概ね同様の結果になると想定し、全断面に初期軸力が作用しているとしてモデル化を行った。すなわち、本節では各供試体間に差異を与えると考えられる要因の中で、鉄筋かぶり及び材料特性の差異のみをモデルに反映させた。これにより各供試体間での鉄筋かぶりと材料特性の差異が、復元力特性に与えた影響に焦点を当てた検討を行った。

なお、本検討では、実験で見られた載荷に伴う軸力増大の影響を模擬するため、図-19に示す解析手順を取った。まず、各サイクルの最大荷重点の変位 x を読み取る(図-19(a))。次に、軸力-変位関係より当該変位時の軸力を読み取る(図-19(b))。続いて、読み取った軸力を載荷したRC梁のプッシュオーバー解析を行い、変位 x での

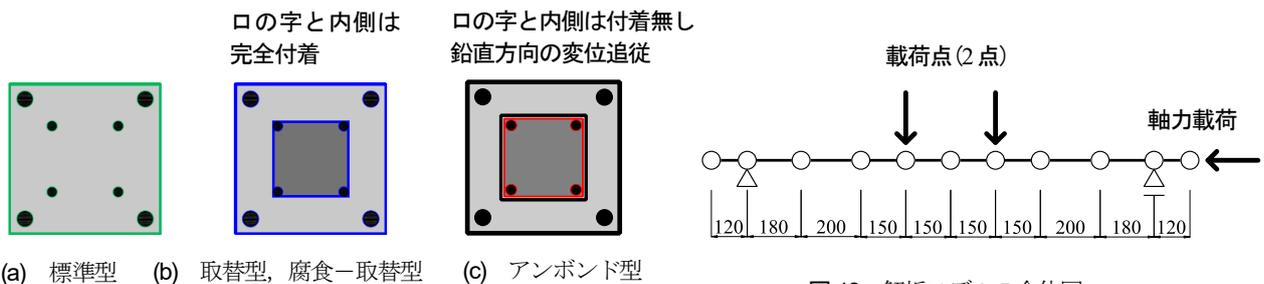


図-17 各モデルの断面形状

図-18 解析モデルの全体図

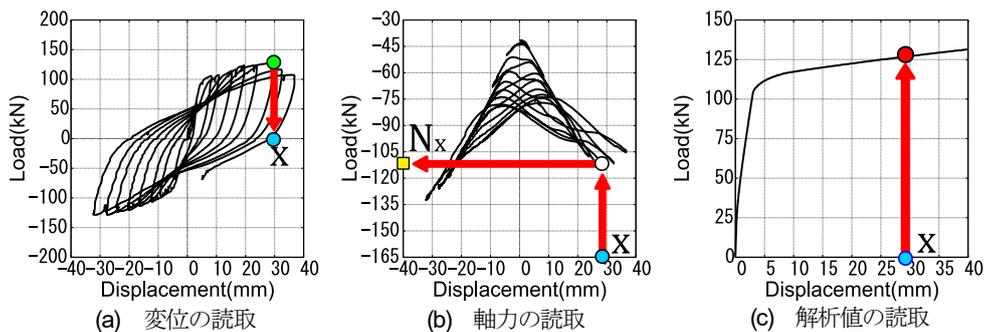


図-19 軸力の変化を模擬した解析の手順

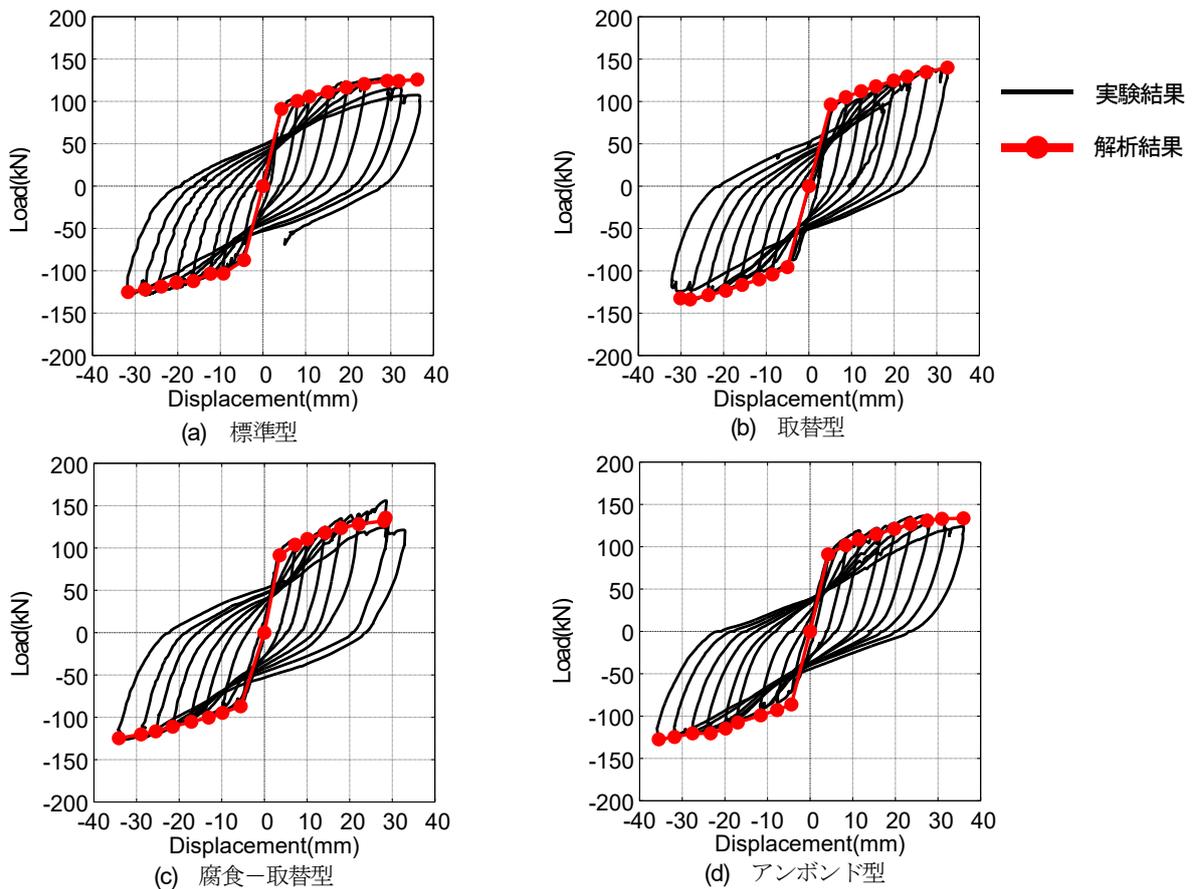


図-20 各供試体の実験結果と解析結果の比較

荷重を読み取る。これらの手順を降伏点及び $+2\delta_y$ 以降のサイクルで行った。

解析結果を図-20に示す。図より各供試体で実験結果を十分に再現できていることが分かる。その結果、本実験で確認された各供試体間の差は、鉄筋かぶり及び材料特性の差に起因するものと考えられる。よって、可換性と維持管理性の両立のために導入した鋼板や、可換部取替により生じた可換部への初期軸力の作用性状の違いが実験結果に与えた影響は小さかったといえる。以上より、軸力支持下での取替そのものは復元力特性に影響を及ぼさないことが分かった。さらに、腐食-取替型に対しても腐食を考慮しない供試体と同様の手順で解析を行った結果、実験結果を再現できたことから、腐食後の取替が復元力特性に影響を与えないことも確認できた。アンボンド型についても解析により実験の荷重-変位関係が再現できていることが分かる。

(3) 破壊性状

各供試体の終局時の荷重側面の様子を図-21に示す。各供試体のせん断区間のひび割れを比較すると、アンボンド型でせん断ひび割れが顕著に表れていることが確認できる。ただし、荷重時にせん断ひび割れが開いたものの終局時の破壊形態は曲げ破壊であった。また、取替型

及び腐食-取替型においては、アンボンド型ほど顕著ではなかったものの、荷重時に一部のせん断ひび割れが開いていることが観察された。以下、永続部と可換部の付着による影響を考察する。

正負交番荷重実験終了後、アンボンド型において、永続部のせん断区間の可換部を撤去し永続部のひび割れ状況を確認した。図-22(a)にアンボンド型の可換部せん断ひび割れ、図-22(b)にアンボンド型の永続部せん断ひび割れの様子を示す。これからわかるように、アンボンド型においては、可換部にせん断ひび割れがあるものの永続部に到達していないことが分かる。よって、永続部にせん断ひび割れが到達しなかったことで、可換部でせん断ひび割れが発生したものの、供試体全体ではせん断ひび割れが貫通せず、せん断力に抵抗できる状態だったためせん断破壊を起こさなかったと考えられる。ただし、可換部でせん断ひび割れが開いたことにより、せん断変形の影響が標準型に比べて強く出ていると考えられる。これが前項で述べたアンボンド型の荷重-変位関係の履歴面積が小さくなった要因と考えられる。

また、取替型及び腐食-取替型に見られる各供試体のせん断ひび割れは、鋼板を導入した位置と一致したことを確認している。鋼板の導入箇所では、永続部と可換部の付着が切られている。これにより、その区間のみアン

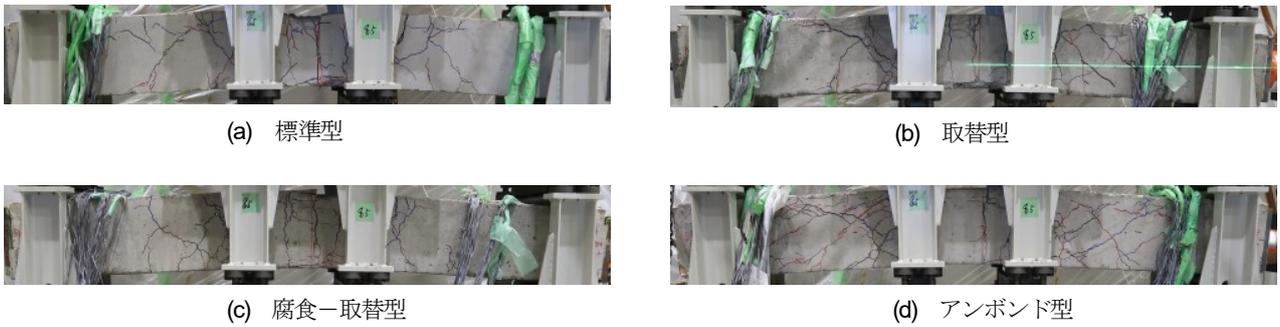


図-21 終局時の各供試体の載荷側面の様子

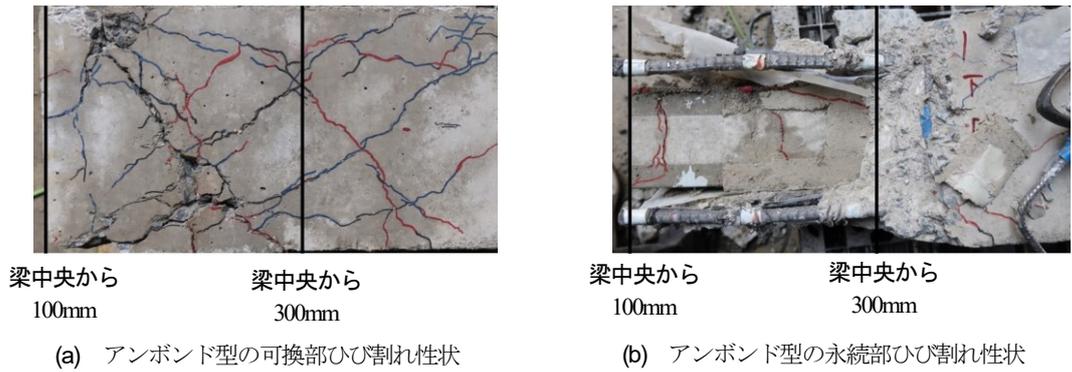


図-22 アンボンド型供試体のひび割れ性状

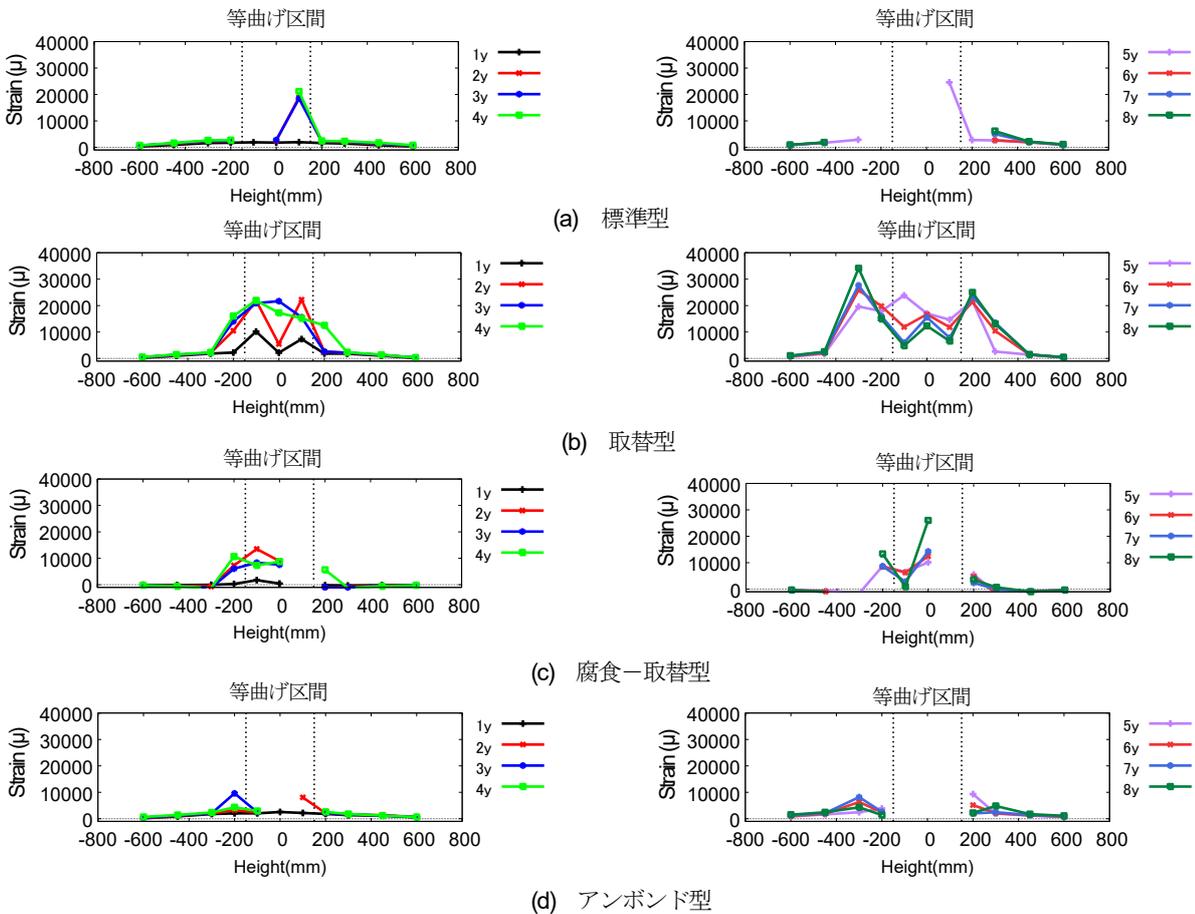


図-23 各供試体の軸方向鉄筋の梁長さ方向ひずみ分布(左側: $+1\delta_y \sim +4\delta_y$, 右側: $+5\delta_y \sim +8\delta_y$)

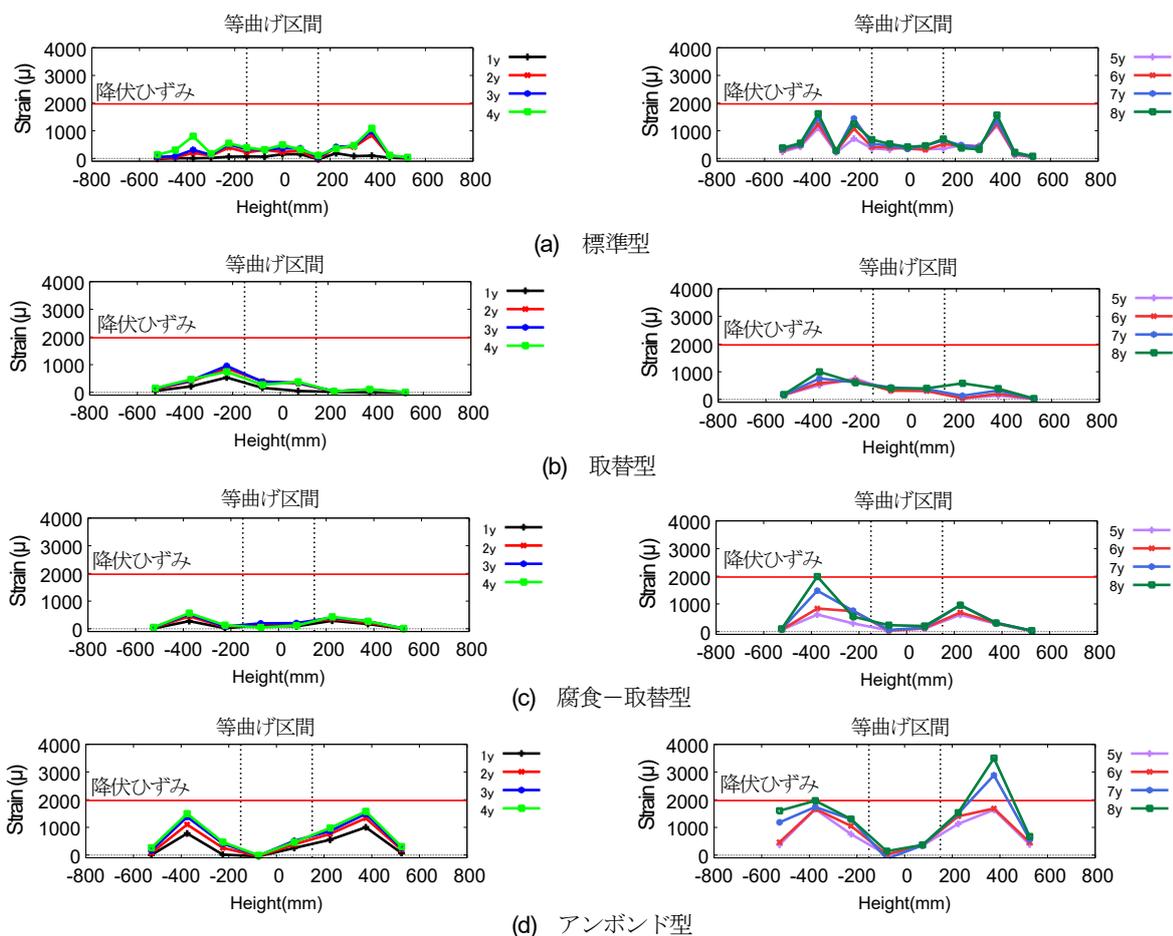


図-24 各供試体の帯鉄筋の梁長さ方向ひずみ分布(左側： $+1\delta_y \sim +4\delta_y$ ，右側： $+5\delta_y \sim +8\delta_y$)

ボンド型と同様に永続部と可換部が別々にせん断力に抵抗する状態となったため、可換部にせん断ひび割れが表れた可能性が考えられる。

(4) 鉄筋のひずみ分布

各供試体の軸方向鉄筋の梁長さ方向ひずみ分布を図-23に示す。図-23中の縦方向の点線は等曲げ区間を表す。図-23を見ると、すべての供試体で等曲げ区間での軸方向鉄筋の塑性化が確認でき、このことから曲げによる破壊が進行していることが分かる。

続いて、帯鉄筋の梁長さ方向ひずみ分布を図-24に示す。図-24中の横方向の赤線は鉄筋の降伏ひずみを表す。図-24(d)を見ると、アンボンド型においてせん断区間における帯鉄筋ひずみその他の供試体に比べて大きくなっていることが分かる。これは、5.(3)でアンボンド型で可換部のせん断ひび割れが開いたことによると考えられる。よって、5.(3)で述べたようにアンボンド型ではせん断ひび割れが永続部に贯通せずせん断力に抵抗できる状態であったものの、帯鉄筋の降伏を抑制させるためにも提案構造実現の際には永続部と可換部の仕切りの大きさ・間隔を適切に調整し、可換部と永続部の付着を確保することが望ましいといえる。

6. 結論

本研究では、耐震性能を担保し腐食劣化時に取替により更新を行う可換部と、取替時にも存続し死荷重支持機能を担保する永続部からなるメタボリズムRC柱構造を提案し、実験的検討により提案構造の実現可能性を検討した。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 永続部と可換部一体型のメタボリズム構造に対して取替実験を実施し、永続部のみで軸力を支持したまま可換部の撤去、取替が可能であることを確認した。この際、可換性と維持管理の両立のために導入した鋼板が、作業性の向上及び永続部の保護に機能していることが確認され、鋼板導入に一定の効果があつたことが確認された。
- 正負交番載荷実験を実施した結果、標準RC供試体と提案構造を有する供試体はともに曲げ破壊をしたことを確認した。一部見られた復元力特性の差については、解析の結果から取替による材料特性の変化及び鉄筋かぶりの製作誤差に起因することが分かった。また、これより永続部で軸力を支持したままでの可換部の取替及び腐食発生後の取替が、復元力特性に影響を与えないことが分かった。

- 永続部と可換部の付着の有無による影響を検討した結果、復元力特性には変化を及ぼさないことが確認された。一方で、ひび割れ性状には変化が見られ、永続部と可換部の付着を完全に切ったアンボンド型ではせん断ひび割れが開いたことが確認された。また、取替を行った取替型、腐食一取替型についても、付着が切れている鋼板位置では一部せん断ひび割れが開いたことを確認した。
- 永続部と可換部の付着が不十分なため、せん断力が永続部に伝達せず可換部のみで受け持ったことから、可換部のせん断ひび割れが進展し、帯鉄筋の降伏が見られた。せん断ひび割れの発生抑制及び帯鉄筋の降伏抑制のために、仕切りの大きさ及び間隔の調整を行い永続部と可換部の付着を促進することが望ましいといえる。

謝辞：本研究の一部は国立研究開発法人科学技術振興機構の持続可能開発目標達成支援事業『ミャンマーの地震災害に対する橋梁構造物強靱化へ向けた課題抽出のための大型共同実験』及び科学研究費補助金基盤研究(A)21H04574の助成のもと行った。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 川西貴士, 石関嘉一, 平田隆祥, 富井孝喜: 高強度かつ高耐久のセメント系補修・補強材料「タフショットクリート」, 大林組技術研究所報, No.81, 2017.
- 2) Chenga, C.T., Yanga, J.C., Yehb, Y.K., and Chen, S.E.: Seismic performance of repaired hollow-bridge piers, *Construction and Building Materials*, 17(5), pp.339-351, 2003.
- 3) 藤倉修一, 忍田祥太, 臼井裕太, NGUYEN Minh Hai, 中島章典, 浦川洋介: レベル2地震損傷後に修復可能なRC橋脚の提案および実験的検証, 土木学会論文集A1, 75(4), pp. I591-I601, 2019.
- 4) 前田紘人, 林学, 高橋良和: メタボリズム耐震橋脚構造の開発に向けた正負交番載荷及び塑性ヒンジ部取替実験, 土木学会論文集A1, 76巻4号, pp.I_377-I_392, 2020.
- 5) 林学, 植村佳大, 高橋良和: 埋込継手構造を用いた塑性ヒンジ部取替によるRC橋脚の耐震性能回復に関する実験的検討, 土木学会論文集A1, 77巻4号, pp.I_424-I_435, 2021.
- 6) 林学, 植村佳大, 高橋良和: 埋込メナーゼヒンジRC橋脚の地震後復旧性に関する実験的検討, 第23回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演概要集, pp.75-82, 2021.
- 7) Ying Ma, Yi Che., Jinxin Gong.: Behavior of corrosion damaged circular reinforced concrete columns under cyclic loading, *Construction and Building Materials*, Vol 29, pp.548-556, 2012.
- 8) 近田康夫, 松島学, 畦崎成志: 心理的影響に基づくコンクリート構造物の補修時期に関する一考察, 土木学会論文集, No.682, 1-56, pp.289-298, 2001.
- 9) 植村佳大, 高橋良和: あと施工した耐震補強部への軸力伝達性状に関する解析的検討, 第23回橋梁等の耐震設計シンポジウム講演論文集, pp.281-286, 2021.

EXPERIMENTAL STUDY ON RC COLUMN CAPABLE OF REPLACEMENT OF CORRODED REBAR WITH AXIAL FORCE SUPPORT

Tomoya UEDA, Keita UEMURA and Yoshikazu TAKAHASHI

In current treatment of chloride attack, the heavy corroded rebars are replaced, but it is not easy for column structure. In this paper, we try to develop the metabolism RC column structure capable of replacement of corroded longitudinal rebars with axial force support. The proposal structure is made of two parts, exchangeable part and lasting part. The exchangeable part allows the corrosion of its longitudinal rebar. We replace this part and attach new one when corrosion appears. The lasting part supports the axial load when the exchangeable part is replaced. Considering the maintenance and management, there are no gap between the two part in our proposal structure. We make four specimens, one is normal RC and other three specimens have the proposal structure. The controlled variables in the test are corrosion level and presence or absence of the bond between exchangeable part and lasting part. Replacement experiments and cyclic loading tests are conducted. Test results show that rebar replacement with axial force support is possible independent of corrosion level, and replacement with axial force support has no effect to the restoring force characteristics. The lack of the bond between exchangeable part and lasting part in replacement experiment changes crack characteristics. Shearing cracks open lager when the bond is lack, so it is preferable to promote making the bond strong considering the control of shearing cracks.